

三次元咬合力に基づく咬筋の機能的分化に関する研究

著者	服部 佳功
雑誌名	東北大学歯学雑誌
巻	10
号	1
ページ	1-11
発行年	1991-06-29
URL	http://hdl.handle.net/10097/31370

三次元咬合力に基づく咬筋の機能的分化に関する研究

服 部 佳 功

東北大学歯学部歯科補綴学第二講座

(指導: 鹿沼晶夫教授, 渡辺 誠助教授)

(平成2年12月1日受付, 平成2年12月4日受理)

Functional partitioning of human masseter muscle based on three-dimensional bite force registration

Yoshinori Hattori

Department of Prosthetic Dentistry, Tohoku University

School of Dentistry, Sendai.

(Director: Prof. Akio Kanuma and Associate Prof. Makoto Watanabe)

内容要旨: ヒト咬筋の機能的分化とその機序を明らかにする目的で, 顎口腔系に機能異常を認めない正常有歯顎者3名に三次元咬合力測定装置を応用し, クレンチング時の咬合力の大きさと方向を種々に変化させながら, 右側咬筋運動単位の活動を導出し, 以下の知見を得た。

1) 各々の運動単位は, 活動を示す固有の咬合力方向の範囲を有した。前, 左方の咬合力方向で発火する運動単位が多く, 後, 右方で発火する運動単位は少なかった。

2) 咬合力方向を9分割し, それぞれの方向で運動単位の発火の有無を調べ, 発火を示す方向の数を活動領域と定義したところ, 活動領域と運動単位の発火閾値の間には, 負の相関が認められた。

3) 運動単位の活動領域は, 記録部位により異なり, 前部および深部より記録した運動単位で広く, 浅部の運動単位で狭い傾向が認められた。この活動領域の相異は, 前後的記録部位間と比較して, 深さの異なる記録部位間で著明に観察された。

以上の結果は, 個々の運動単位の収縮力の関与が運動単位の存在部位や筋線維走行によって異なることに起因するものと思われた。また, このことは咬筋内部の機能的分化を示唆するものと推察された。さらに, 咬筋内部の機能的分化が前後的部位に比較し, 深部と浅部の間に著明に認められたことは, 咬筋の層状構造を反映するものと考察された。

結 言

ヒトの咬筋は頬骨弓の下縁および内面に, 前後的に幅広く起始し, 下顎骨の下顎枝外側面に広く停止する。咬筋は浅部と深部に分けられており¹⁻⁵⁾, それぞれは腱中隔によってさらに数層に細分される^{6,7)}。筋線維の配列は多羽状筋と呼ばれるように, 筋層を隔てる腱中隔に対して筋線維が斜走し, これに付着する^{8,9)}。このため, 筋線維各々の収縮方向と筋全体の収縮方向が相異

するものと考えられている。

また組織化学的研究から, その筋線維構成は筋内各部において異なることが報告されている。咬筋全体ではI型線維が優勢で, その割合は後部に比べて前部で高い。II B型線維は後方に多く, なかでも浅部筋束に多く含まれる¹⁰⁾。浅部に含まれるII型線維の線維径は中間部や深部と比較し, 著しく細いとされる¹¹⁾。

このように咬筋は形態学的に複雑であるうえに, 組織学的に不均質である。これらの複雑な構造は, 咬筋

の多様な機能と密接に関連するものと思われる。しかしながら、咬筋の複雑な形態や、筋内部の組織学的不均質が、筋機能にどのように反映されているかを明らかにした報告は少ない。

古くは三浦¹²⁾が針電極により浅部と深部の運動単位活動を導出し、咬合時には両部の運動単位がともに活動し、閉口運動時には深部のみが活動することを報告した。近年、筋内の組織学的不均質性が明らかにされるにともない、ブタ¹³⁾、ウサギ¹⁴⁾、ヒト^{15,16)}の咬筋では、部位による筋活動の相異が報告されている。なかでも Weijs と Dantuma¹⁴⁾は、ウサギ咬筋の局所的活動を極細ワイヤ電極を用いて検索し、咀嚼運動時には、作業側咬筋深部の筋分画が浅部の分画と比較し、閉口相の早い時点で活動し始めるが、平衡側ではその反対であることを報告している。これらの知見より、咬筋はその全体が一体として機能するばかりでなく、機能に応じて各部位が選択的に活動することが示唆された。しかし、形態学的不均質性とその機能に関しては、未だ不明な点が多く、各部位の運動単位の機能的性質をさらに明らかにする必要があるものと思われる。

運動単位の機能的性質に関する従来の研究は、動員閾値、単収縮張力、単収縮時間とそれに基づく筋線維タイプの分類¹⁷⁻¹⁹⁾や、筋疲労現象の解明²⁰⁾に主眼がおかれ、咬筋各部位の機能的分化を明らかにした報告はほとんど見あたらない。

一方、菊池ら²¹⁾は三次元咬合力測定装置を用いて咀嚼筋活動を分析し、咬筋、側頭筋の活動が、咬合力の方向と大きさによく対応することを報告した。このことは、機能の指標として三次元咬合力を用いることにより、咬筋各部位の運動単位の機能的特徴をより明確に示うことを示唆している。

そこで本論文では、形態学的に複雑な咬筋の機能的分化とその機序を明らかにすることを目的とし、三次元咬合力測定装置を用いて等尺性クレンチング時の三次元咬合力と咬筋運動単位活動を同時記録した。さらに三次元咬合力と運動単位の機能的特性の関連を明らかにし、咬筋各部位の機能的特徴を検索した。

方 法

正常咬合有歯顎者で、顎口腔系に機能異常とその既往を認めない成人男性 3 名（年齢 26～45 歳、平均 34.3 歳）を被験者とした。これらの被験者を用いて、咬筋運動単位の活動と三次元咬合力を同時記録した。運動

単位活動の導出には生体信号用増幅器（日本電気三栄社製、バイオトップ 6R12）を、咬合力の測定には三次元咬合力測定装置と歪増幅器（日本電気三栄社製 6M82）を用いた。また、導出した運動単位活動と三次元咬合力は、多チャンネル FM データレコーダ（TEAC 社製 XR7000）にテープ速度 9.5 cm/s（周波数帯域 DC-10 kHz）で同時記録した。データの処理には TAINS/BBMS に公開されたパブリックドメインソフトウェア GraphP を用い、グラフィック社製 XY プロッター MP2000 を駆動した。

1. 三次元咬合力の測定

三次元咬合力はさきに関連した咬合力センサ^{22,23)}を用いて口蓋正中中部で測定した。測定時には、下顎のベアリングボールと上顎の咬合力センサの 3 つの受圧面のみを接触させた。このとき上下顎間の咬合拳上量は最小となるように心がけた。その結果、各被験者の咬合拳上量は前歯部で 3 mm 以内であった。咬合力方向は FH 平面への垂線に対する、前後、左右の角度によって表示した。

咬合力センサの出力は、3 ch の歪増幅器を介したのちシグナルプロセッサ（日本電気三栄社製 7T18）に入力し、約 100 ms 毎の三次元咬合力をグラフィック画面に表示した²⁴⁾。

2. 咬筋運動単位の導出

記録電極は、直径 0.31 mm 長さ 37 mm のテフロン被覆ステンレス鋼製単極針電極（TECA 社製 MF37）で、露出部分の長さが 0.3 mm、そのテーパは約 1/2 であった。不関電極には電極糊付表面電極（3M 社製 Littmann™ 825VP、面積 4 cm²）を用いた。この表面電極の中央に、針電極を刺入するための直径 5 mm の円孔を設けた。

咬筋運動単位活動は針電極とその周囲の皮膚面に貼付した表面電極間で導出し、生体信号用増幅器を用いて増幅した。その出力はメモリスコープと陰極線オシロスコープに入力し、運動単位の記録状態、発火頻度、波形などをモニタした。同時にスピーカに入力し、活動状態を音信号としてモニタした。

針電極の刺入部位を決定するために、被験者に強いクレンチングを命じて右側咬筋浅部の外形を皮膚上から探り、その前縁と後縁を触知した。この触診から針電極刺入部位である、咬筋前部、中央部、後部の 3 点を決定した。前部は鼻聴道線上で、触知した咬筋浅部

前縁より 5 mm 後方の部位, 後部は鼻聴道線より 2 cm 下方で, 触知した咬筋浅部後縁より 5 mm 前方の部位, 中央部は前部と後部の midpoint とした。

3. 運動単位活動の賦活

咬筋運動単位の活動を賦活するため, 被験者に 10 ~ 20 N 程度の軽いクレンチングを命じた。この際, 咬合力の大きさと方向を随意的に調節させる目的で, リアルタイムでシグナルプロセッサにグラフィック表示される三次元咬合力をフィードバック信号として被験者に視認させた。この状態で, 針電極を刺入し徐々に

深度を変化させ, 安定に記録される 1 個ないし振幅の異なる数個の運動単位の分離, 記録を行った。この記録は, 針電極先端が骨面に到達するまで, 連続的に行われた。

記録された運動単位活動の発火閾値を求めるため, 最も弱い咬合力で発火する咬合力方向を探るよう, 被験者に命じた。また, 運動単位の発火する咬合力方向の範囲を求めるため, 閾値の 2 倍程度の咬合力でその方向を任意に変化させた。発火が認められない方向では, 咬合力を増大させ同様の実験を行った。

咬合力方向に関する一連の実験終了後, 咬合力を運

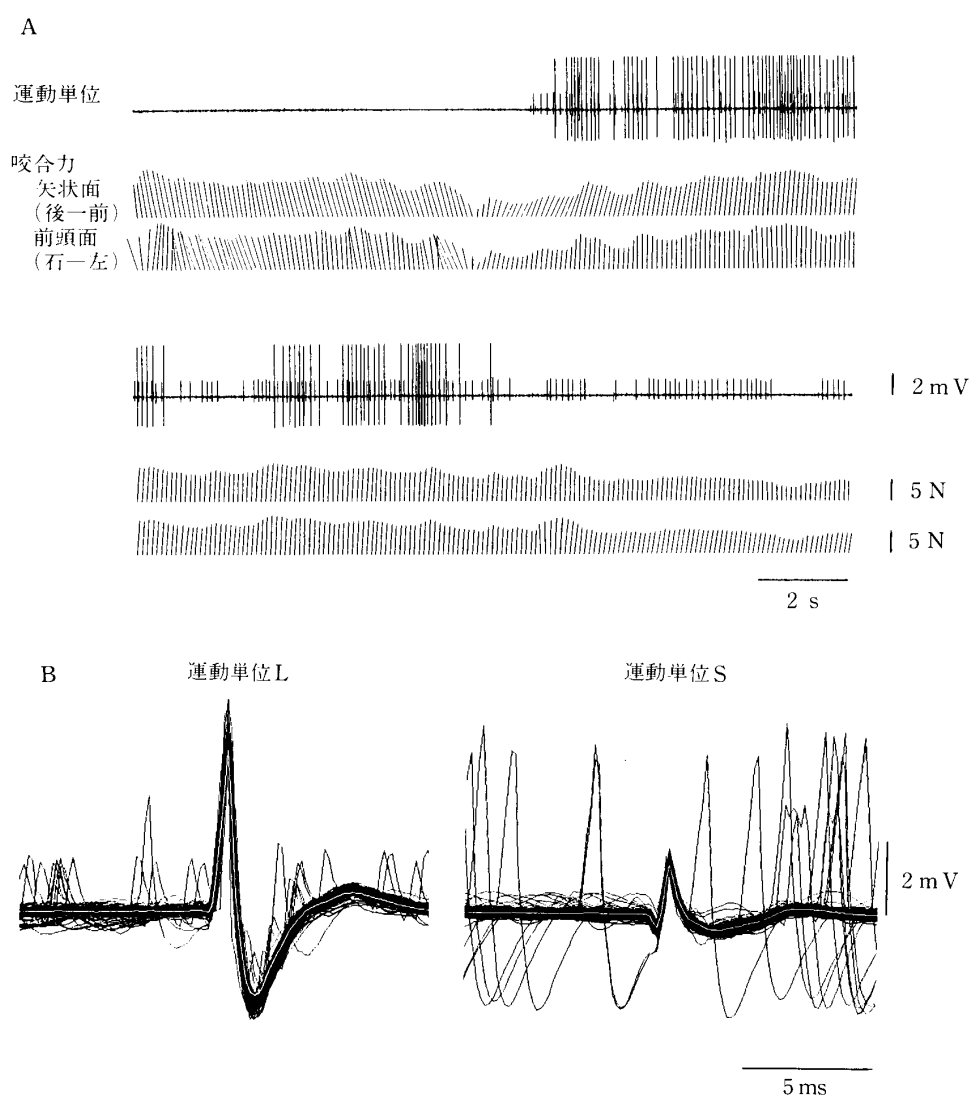


図 1 運動単位活動と三次元咬合力の同時記録の一例

A: 咬合力の大きさと方向の変化に伴う運動単位活動

上段は運動単位活動の原波形, 下段は矢状面 (右側が前方) と前頭面 (右側が左方) に投影した三次元咬合力

B: A で記録された 2 つの運動単位 L, S の活動波形の 100 回の重ね合わせ

動単位が容易に発火する方向に戻し、実験開始時と同一の運動単位の存在を確認した。また各々の運動単位の活動の記録開始時と終了時に電極の刺入深度を測定した。

4. 運動単位と三次元咬合力の分析方法

分離, 同定された運動単位活動の記録区間に関して, その運動単位活動と三次元咬合力センサの出力を, 15 s 間毎に順次データレコーダからシグナルプロセッサに入力した。このとき, A/D 変換のサンプリング間隔は 0.125 ms である。これを 1 s 毎の分析区間に分割し, 各分析区間をさらに 100 ms の小区間に分割し, 各小区間について三次元咬合力の平均値を算出した。この値をシグナルプロセッサのグラフィック画面上に運動単位活動の原波形と共に表示した。

各分析区間の三次元咬合力の平均値, 咬合力の大きさと方向, および分析対象の運動単位の活動を一連のデータとして出力した。これらをパーソナルコンピュータ上のリレーショナルデータベース (RBASE Pro™) に転送し, 運動単位の発火閾値, 咬合力方向に対する活動範囲などを検索した。

結 果

1. 咬筋運動単位の一般的性質

針電極を注意深く刺入し探索することにより, 運動単位の活動を安定かつ持続的に記録することができた。3 名の被験者から記録された運動単位の総数は 72 個であった。これらの運動単位を種々の検索に供し, 以下の結果を得た。

1) 記録された運動単位の一例

運動単位活動は咬合力の大きさ, 前後, 左右方向およびそれらの変化によって大きく影響を受けた。その影響は発火の開始, 停止および発火頻度の変化として観察された (図 1A)。図 1 は, 右側咬筋後部の浅部から 684 s 間にわたり記録された結果の一部である。図 1A に観察された振幅の異なる 2 種の活動が, それぞれ異なった単一運動単位の活動であることを同定するため, ウインドウコンパレータを用いて分離し, 活動波形を重ね合わせた (図 1B)。その結果, 本例には 5.7 mV の振幅を有する運動単位 L と, 2.3 mV の振幅の運動単位 S が観察されることが認められた。

図 1A には, S のみの発火する区間, S, L いずれもが発火するものの S の発火が優勢である区間, L の発

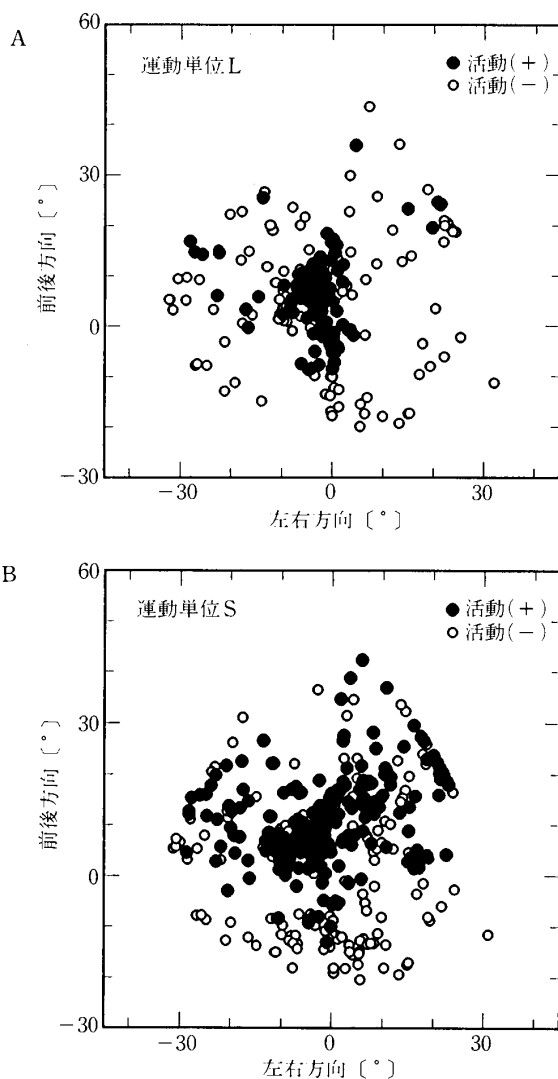


図 2 図 1 に示した 2 つの運動単位 L, S の活動領域
●: 運動単位の発火を認める咬合力方向
○: 運動単位の発火を認めない咬合力方向
A: 運動単位 L の活動領域
B: 運動単位 S の活動領域

火が優勢である区間, および両運動単位の発火を認めない区間が観察された。これらの区間ではそれぞれ咬合力の大きさ, 方向が異なり, 運動単位の活動が咬合力の大きさ, 方向に依存すること, およびそれらは運動単位によって異なることを示唆している。

そこで両運動単位の活動する咬合力方向を求めるため, 発火活動の有無を咬合力の前後 (Y 軸, 前方: 正), 左右 (X 軸, 右方: 正) の両座標上にプロットした (図 2)。この結果, 運動単位 L (図 2A) は運動単位 S (図 2B) と比較して発火活動を示す咬合力方向が局限しており, その範囲は S の範囲に含まれていた。すなわち

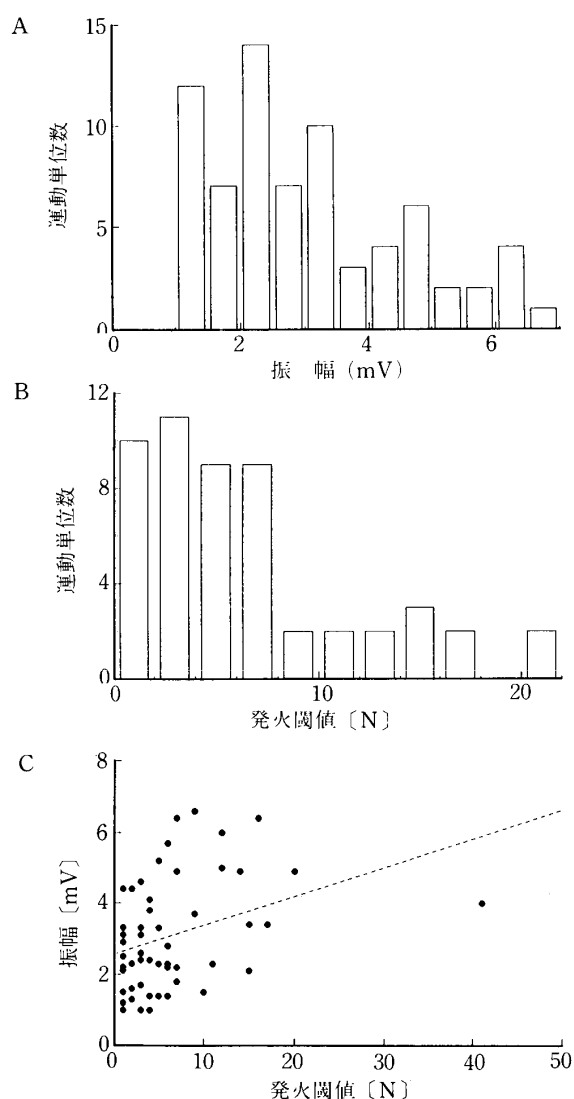


図3 運動単位の基本性質
A: 運動単位活動の振幅のヒストグラム
B: 発火閾値のヒストグラム
C: 発火閾値と振幅の関係
破線は回帰直線を示す

運動単位が動員される咬合力方向の範囲は、運動単位によって異なることが明らかになった。

そこで、図2のX軸、Y軸上で咬合力方向を左前方($X < -10, Y > 15$)、左上方($X < -10, -5 < Y < 15$)、左後方($X < -10, Y < -5$)、前上方($-10 < X < 10, Y > 15$)、上方($-10 < X < 10, -5 < Y < 15$)、後上方($-10 < X < 10, Y < -5$)、右前方($X > 10, Y > 15$)、右上方($X > 10, -5 < Y < 15$)および右後方($X > 10, Y < -5$)の9区画に分割し、各々の咬合力方向の区画について、運動単位の発火の有無を調べた。このとき、発火が認められた区画数を活動領域と定義し、運動単位が動員さ

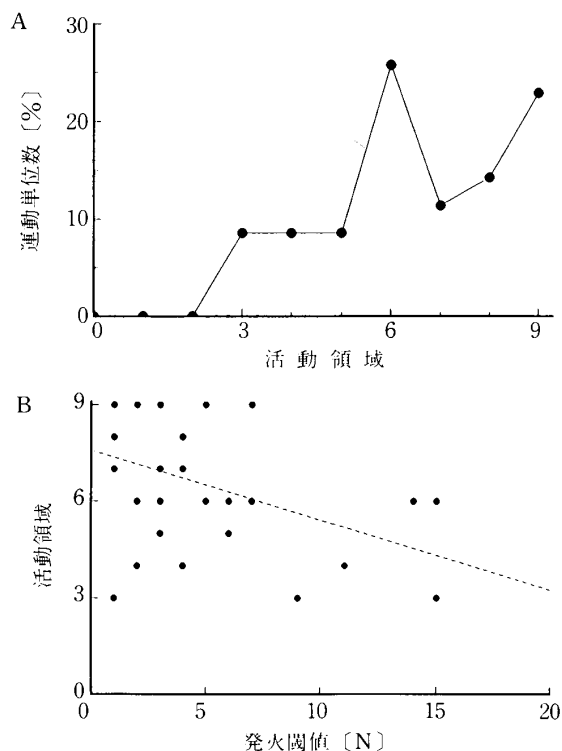


図4 運動単位の活動領域
A: 運動単位の活動領域のヒストグラム
B: 発火閾値と活動領域の関係
破線は回帰直線を示す

れる咬合力方向の範囲を示す指標とした。

その結果、運動単位Sは左後方と右後方以外で動員され、その活動領域は7区画であった。また運動単位Lは右上方、左後方、右後方の3方向以外で動員されて、活動領域は6区画であり、両者間に相異が観察された。

2) 活動電位の振幅

記録した72個の運動単位において、その活動電位の振幅は 3.04 ± 1.53 mV (平均±標準偏差)であった。振幅は低振幅側に偏って分布していた(図3A)。

3) 発火閾値

発火閾値を検索し得た52個の運動単位について分析を行った結果、発火閾値は 6.5 ± 6.8 Nで、1~41 Nに分布していた。発火閾値の分布も低閾値側に偏り、とりわけ1~7 Nの範囲に39個(75%)の運動単位が含まれていた(図3B)。

4) 発火閾値と振幅の相関

図3Bに供した52個で発火閾値xと振幅yについての回帰直線を求めた。その結果、

$$y = 2.57 + 0.08x$$

を得た。この回帰直線の傾きは、傾き 0 と比較して有意に大きかった ($p < 0.01$)。すなわち、発火閾値と振幅との間には、正の相関が認められた (図 3C)。

2. 咬合力方向による咬筋運動単位活動

1) 運動単位の活動領域

さきに記した 9 区画の咬合力方向のうち、8 区画以上についてその発火の有無を検索し得た 35 個の運動単位の活動領域を検索した。各運動単位の活動領域は 6.6 ± 1.9 区画で、3~9 区画に分布していた。なかでも 6 および 9 区画に活動領域を有する運動単位が比較的多く観察された (図 4A)。

2) 発火閾値と活動領域の相関

図 4A に供した 35 個の運動単位の発火閾値 x と活動領域 y について、回帰直線を求め、

$$y = 7.58 - 0.22x$$

を得た。回帰直線の傾きは、傾き 0 と比較して有意に小さかった ($p < 0.01$)。すなわち、発火閾値と活動領域との間には負の相関があり、発火閾値の高い運動単位は動員される咬合力方向の範囲が狭いことが明らかになった (図 4B)。

3) 各咬合力方向に応答する運動単位の割合

9 分割した咬合力方向の各区画について、各運動単位の発火を検索し、応答する運動単位数の割合を求めた (図 5)。その結果、上方、前方、左方および左前方では、検索した運動単位の 90% 以上で発火を認め、左前方以外の 3 方向では 96% の運動単位が発火を示した。各咬合力方向において検索した延べ 405 個の運動単位中、それぞれの咬合力方向で発火を示した運動単位の総数は 313 個であった。すなわち、各咬合力方向において平均 77% の運動単位が発火を示した。これと比較し上方、前方、左方 ($p < 0.01$)、および左前方 ($p < 0.05$) で発火する運動単位数の割合は有意に高かった。

一方、後方 3 方向で発火する運動単位数の割合は 60% 以下であり、とりわけ右後方では 41% と低率であった。これらは先の平均値に比べて有意に低かった (後方: $p < 0.02$, 左右後方: $p < 0.01$)。

すなわち、咬合力が前方あるいはその筋の対側に向かうとき、発火を示す運動単位の割合が高く、一方、咬合力方向が後方、あるいは筋と同側であるとき、発火する運動単位の割合が低いことを示している。

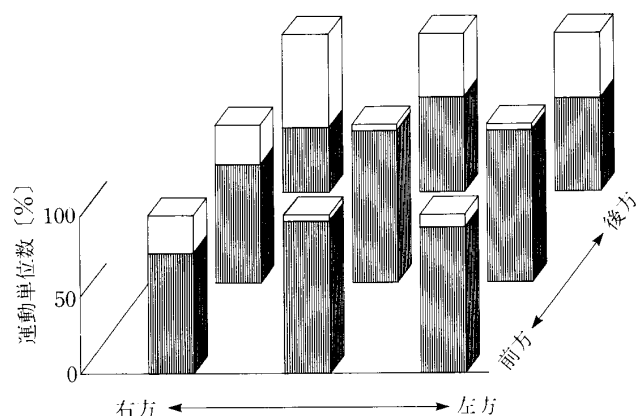


図 5 各咬合力方向に応答する運動単位数の割合
X 軸: 咬合力の左右方向
Y 軸: 咬合力の前後方向
Z 軸: 運動単位数 (%)

3. 記録部位による運動単位の相異

1) 前後の記録部位の相異

咬筋の前後の部位間でそこに含まれる運動単位の相異を明らかにする目的で、それぞれの部位について、さきに分析を行った各項目の検索を行った。記録された 72 個の運動単位中、前部の運動単位は 23 個、中央部は 11 個、後部は 38 個であった。各部の運動単位の振幅は、前部では 2.9 ± 1.5 mV、中央部では 3.0 ± 1.9 mV、後部では 3.1 ± 1.5 mV であった (図 6A)。

(1) 発火閾値

分析を行い得た前部の 13 個、中央部の 8 個、後部の 31 個の計 52 個の運動単位について、前後の記録部位別に発火閾値の分布を求めた。前部は 8.8 ± 10.9 N、中央部では 3.0 ± 3.1 N、後部では $6.4 \text{ N} \pm 4.9 \text{ N}$ であった。これらの結果から、中部の発火閾値は前部 ($p < 0.01$)、後部 ($p < 0.05$) と比較して有意に低く、また前部の発火閾値は後部と比べて有意に高かった ($p < 0.01$) (図 6B)。

(2) 活動領域

活動領域を検索し得た前部の 9 個、中央部の 7 個、後部の 19 個の計 35 個の運動単位について、前後の記録部位別に活動領域を求めた。前部は 8.0 ± 1.5 区画、中央部では 6.3 ± 2.3 区画、後部では 6.0 ± 1.7 区画であった。これらの結果より、前部の運動単位の活動領域は中央部 ($p < 0.05$)、後部 ($p < 0.01$) と比較して有意に広いことが明らかになった。また中央部と後部には有意差が認められなかった (図 6C)。

(3) 各咬合力方向に応答する運動単位の割合

前後的各記録部位について、9分割した咬合力方向の各区画に responding 運動単位数の割合を検索した (図7)。その結果、前部に比較し後部では、後方ないし左後方 ($p < 0.05$) で発火を示す運動単位の割合が少ないことが明らかになった。

しかしながら、運動単位が各咬合力方向について発火を示す割合の平均値 77% と、各記録部位から得た発火を示す運動単位の割合との間には、いずれの咬合力方向、記録部位においても有意差は認められなかった。

2) 記録部位の深度の相異

深度の異なる咬筋の部位間で運動単位の相異を明らかにするため、各部位について、さきに分析を行った各項目の検索を行った。記録部位の深度は、各刺入の試行毎に、運動単位活動を記録し得た最も浅い電極深度から、電極先端が骨面に到達した深度の間を3等分し、それぞれ浅部、中間部、深部に区分した。この区分により深度を検索し得た運動単位は、浅部 19 個、中間部 20 個、深部 25 個であった。各部位の運動単位の振幅は、浅部では 3.1 ± 1.6 mV、中間部では 2.6 ± 1.5 mV、深部では 3.3 ± 1.3 mV であった (図8A)。

(1) 発火閾値

閾値を検索し得た浅部の 14 個、中間部の 16 個、深部の 17 個の計 47 個の運動単位について、深度別の発火閾値の分布を求めた。浅部は 9.1 ± 5.1 N、中間部では 4.4 ± 3.4 N、深部では 8.1 ± 9.8 N であった (図8B)。

(2) 活動領域

運動単位の活動領域は、浅部 10 個、中間部 12 個、深部 8 個の計 30 個の運動単位について検索できた。その結果、各部位の活動領域は、浅部で 5.7 ± 2.1 区画、中間部で 6.3 ± 1.6 区画、深部では 8.1 ± 1.1 区画であった (図8C)。

これらの結果から、浅部、中間部の運動単位に比べて、深部の運動単位は活動領域が有意に広い (ともに $p < 0.01$) が明らかになった。

(3) 各咬合力方向に responding する運動単位の割合

深度の異なる各記録部位について、9分割した各咬合力方向に responding する運動単位数の割合を検索した (図9)。その結果、広範な咬合力方向において、深部は他

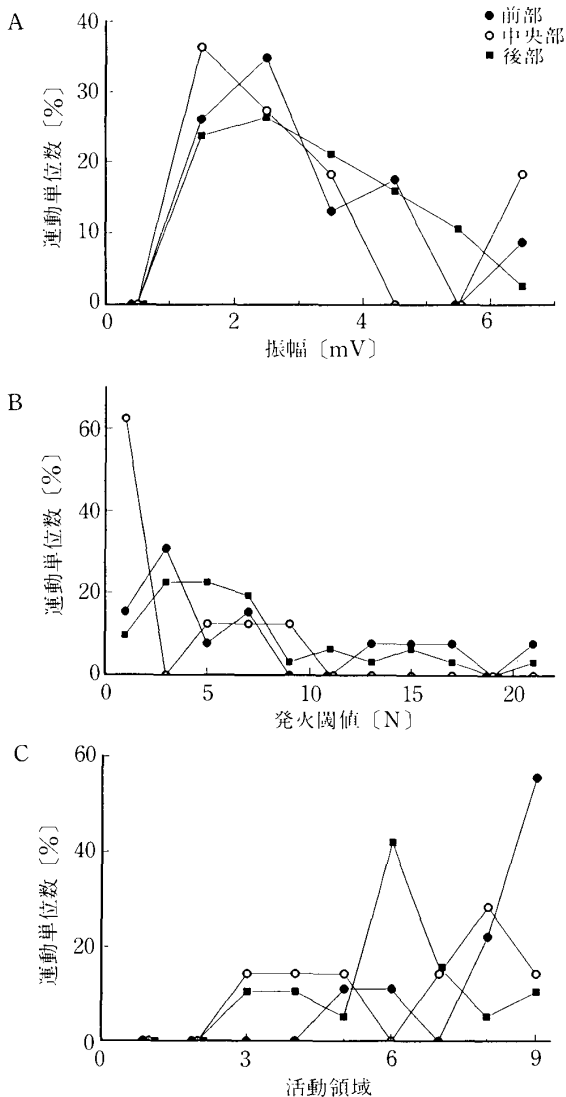


図6 前後的に異なる部位から記録された運動単位の性質

●: 前部, ○: 中央部, ■: 後部の運動単位

A: 各部位の運動単位の振幅の分布

B: 各部位の運動単位の発火閾値の分布

C: 各部位の運動単位の活動領域の分布

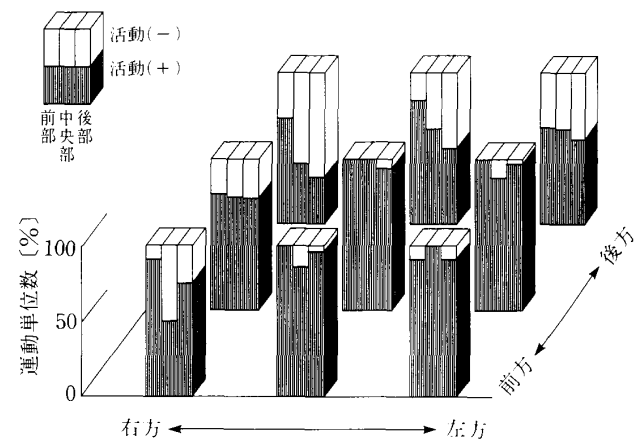


図7 前部、中央部、後部における各咬合力方向に responding する運動単位数の割合

X, Y, Z 軸は図5と同じ

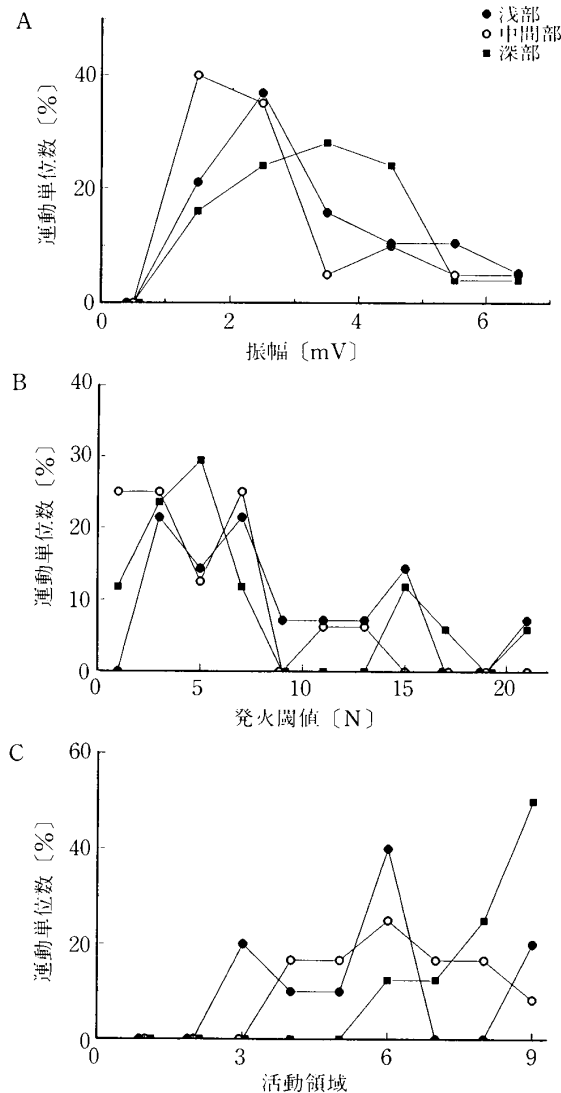


図8 深度の異なる部位から記録された運動単位の性質

- : 浅部, ○: 中間部, ■: 深部の運動単位
- A: 各部位の運動単位の振幅の分布
- B: 各部位の運動単位の発火閾値の分布
- C: 各部位の運動単位の活動領域の分布

の部位と比較して発火を示す運動単位の割合が高いことが明らかになった。統計学的には、深部の運動単位が発火を示す割合は右上方では浅部より ($p < 0.05$), 左後方では浅部, 中間部より ($p < 0.05$), 後上方では浅部, 中間部より ($p < 0.01$), また右後方では浅部 ($p < 0.05$), 中間部 ($p < 0.01$) より, それぞれ有意に高かった。

次に, 運動単位が各咬合力方向について発火を示す割合の平均値 77% と, 各記録深度から得た発火を示す運動単位の割合とで, 統計的検索を行ったところ, 深部では後上方と右後方において有意に発火を示す運動

単位数の割合が高い ($p < 0.05$) ことが認められた。

これらの結果から, 運動単位は記録部位によってその機能的性質を異にすることが明らかになった。また部位間の相異の程度は, 前後的な部位間と比較して, 深度の異なる部位間において, より著しく認められた。

考 察

1. 研究方法

1) 運動単位活動の記録

一般に, 運動単位の活動の導出には双極の極細ワイヤ電極または同心型針電極を記録電極として用いるが, 前者は記録部位を任意に変化させることが困難であり, また後者は電極の直径がやや太く, 刺入時および記録時に組織に障害を与えやすい欠点が指摘されている。そこで本研究では, 先端部以外がテフロンコーティングされたステンレス製の細い単極針電極を記録電極として用い, 低周波数成分を濾過することにより, 運動単位活動を導出した²⁵⁾。これにより, 被験者に不快感を与えることなく, 運動単位活動を安定して分離, 記録することが可能であった。

また, 咬筋は前後的に異なる広がりをもつ筋層が深部から浅部に重積した多層筋である。そのため, 生体では咬筋浅部の広がり皮膚上より容易に触知されるものの, そのほかの筋層ではその前後, 上下的な広がりを知ることは困難である。そこで, 針電極の刺入部位の決定には, 咬筋の層構造について詳細な分析を行った吉川と鈴木⁶⁾および沢田⁷⁾の報告を参考にした。

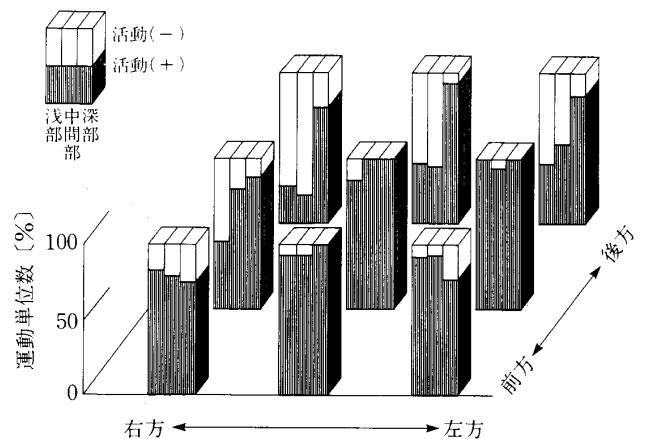


図9 浅部, 中間部, 深部における各咬合力方向にตอบสนองする運動単位数の割合
X, Y, Z 軸は図5と同じ

2) 運動単位活動の賦活

等尺性クレンチング時の運動単位活動は、咬合力の大きさ、方向およびその変化速度の3つの要素の影響を受ける。したがって、これら3要素のうち2要素を一定、残りの1要素を可変として、独立に分析することが望ましい、3要素のうち咬合力の変化は、咬合力がほぼ定常状態にあることを確認することにより、実験条件を満たすことができる。一方、咬合力の大きさと方向の2要素については、三次元咬合力測定装置の視覚的フィードバックを被験者に応用することで、可能である。しかしながら、本研究では針電極を用いており、筋組織への侵襲を極力少なくする必要がある。そこで、本研究では被験者に随時指示を与えながら、咬合力の大きさと方向の両者を同時に変化させた。

3) 分析方法

咬合力の大きさ、方向と運動単位活動との相互の関連を正確に検索するためには、各々が定常的に発現していることが重要である。そこで本研究では、各分析区間を1区間100 msの10個の小区間に分割し、各小区間について三次元咬合力の平均値を算出した。次いで隣合う小区間の間の三次元咬合力の変化分を順次算出し、咬合力の変化分が2 Nを越える部分がないことを確認した。この処理により咬合力の大きさや方向の変化の影響を最小限に押し下げたものと思われる。

2. 研究結果

1) 運動単位の咬合力方向に対する特異的応答

本研究から、咬筋の運動単位活動は咬合力の方向に依存することが明らかにされた。また、各咬合力方向に反応する運動単位の割合には、ある一定の傾向が認められることが明らかになった。すなわち、咬合力の方向が前方ないし対側であるときに、発火を示す運動単位の割合が高く、反対に後方ないし同側であるときには低い。この結果は、表面筋電図を指標として咬筋活動と三次元咬合力の相関性を分析した菊池ら²¹⁾および van Eijden²⁶⁾の報告と一致していた。

また、運動単位の活動領域は発火閾値と負の相関が、発火閾値と振幅には正の相関が観察された。これらの結果は、発火閾値が低く、振幅の小さい運動単位は広い活動領域を有し、発火閾値が高く、振幅の大きい運動単位は狭い活動領域を有することを意味している。一般に運動単位の閾値と単収縮張力には正の相関が認められている¹⁷⁾。これらの知見より、閾値が小さく収縮力の小さい運動単位は、動員される咬合力方向が広く、

咬合力が増大するにしたがって動員される運動単位は限局した咬合力方向に反応することが示唆された。

2) 記録部位による運動単位の相異

(1) 前後の記録部位による相異

前部から記録された運動単位には、広い活動領域を有するものが多く認められ、著しく活動領域の狭いものは含まれなかった。一方、後部の運動単位には活動領域の広いものは少なく、後方ないし右方では発火を示さない、比較的狭い活動領域を有するものが、最も多く認められた。このように、前後の部位間の運動単位には、その活動領域に相異が認められたが、各々の咬合力方向において発火する運動単位の割合は、各部位における全咬筋運動単位の平均と大きくは異ならなかった。前後の部位間では、解剖学的に筋線維走行が明瞭な相異を示さないものの、組織化学的には咬筋前部はほとんどがI型線維から構成されるのに対し、後部はII型線維に富むことが報告されている¹⁰⁾。I型線維はII型線維と比較して一般に発火閾値が低いことが知られており、本研究の結果より活動領域が広い傾向にあると考えられる。これらの知見から、前後の部位間における運動単位の活動領域の相異は、組織化学的な筋線維構成の相異と関連している可能性が示唆された。

(2) 記録部位の深度による相異

深部に存在する運動単位は、その活動領域が際だって広い点に特徴を有していた。特に、後方3方向において発火する運動単位の割合は他の部位と比較して高く、かつ咬筋運動単位全体の平均と比較しても有意に高い。このように深部の運動単位は、咬筋運動単位の一般的な性質を逸脱しており、深部と他の部位における機能的差異は著しい。

咬筋は多くの筋層が重層した構造であり、深度の異なる部位から記録した運動単位は異なる筋層に含まれるものと思われる。すなわち、運動単位の深度による差異は、咬筋筋層の機能的分化を反映したものであることが示唆された。

これは、深部の筋層と比較して、浅部の筋層は前後のにも上下的にも広い付着部を有しており、筋内部の選択的収縮により収縮力の作用部位や方向に変化を与えうるという力学的因子、あるいは深部にはI型線維が、浅部にはII型線維が多いという組織化学的相異が関与していることが考えられる。

(3) 咬筋の機能的分化

咬筋の内部構造に関して、多くの形態学的研究が報

告されている。森と大内¹⁾は咬筋を浅部、深部に分類し、Du Brul⁵⁾は咬筋後部では浅層と深層に明瞭に區別されるが、前部ではその區別は不明瞭であるとした。またMcMinn²⁷⁾は、咬筋は3層から構成され、その各層が前方で融合するとした。さらにこれらの層構造に加え、Ebert⁸⁾、Schumacher⁹⁾らは、咬筋内部にいくつかの腱中隔の存在を認め、筋線維の多羽状構造を明らかにした。

多羽状構造の機能的意義を、Gans²⁸⁾は筋全体が一塊として収縮するという前提にたった理論的考察の中で、大きな収縮力の発揮に求めた。一方、Herring²⁹⁾は、ブタ咬筋の筋活動からその機能的意義を、各部の選択的収縮による種々の方向への収縮力の発揮にあるとした。

本実験で記録された運動単位は、検索した咬合力方向に対して比較的広範に応答していた。しかし、記録された運動単位の中には、著しく広い活動領域を示すものと、比較的狭い活動領域を有するものが観察された。これらの結果は、多羽状筋である咬筋の内部構造と密接な関連があるものと考えられる。すなわち多羽状筋においては筋内部の筋線維走行は一樣ではないことから、咬筋全体の収縮力に対する個々の運動単位の関与は、その存在部位、走行により大きく異なるものと考えられる。そのため、記録された運動単位の咬合力方向に対する応答性は、必ずしも先に述べた咬筋各層の筋線維走行を直接反映するものではない。

しかしながら、記録部位によって運動単位の活動領域ならびにその方向に相異が観察されたことは、咬筋内部の機能的分化を示唆している。すなわち、筋線維走行などの内部構造、あるいは生体力学的特性の違いにより、筋内各部の機能が異なっているものと考えられる。これらの運動単位の機能的特性は、特に記録部位の深度の相異で著明に認められた。このことから咬筋内部の機能的分化は、前後的な部位の相異と比較して、咬筋の持つ複雑な層状構造と密接に関連しているものと推察された。

結 論

顎口腔系に機能異常を認めない正常有歯顎者3名に三次元咬合力測定装置を応用し、種々の大きさと方向の持続的等尺性クレンチングを負荷した際の、右側咬筋の運動単位活動を導出した。咬筋運動単位の発火活動と三次元咬合力の関連から、咬筋内の部位別に運動

単位の機能を検索し、咬筋の機能分化について以下の結論を得た。

1. クレンチング時の咬筋運動単位の活動は、咬合力の大きさ、方向およびその変化による影響を受けた。
2. クレンチング時に咬筋運動単位は、咬合力方向に対する固有の活動領域を有していた。この活動領域は、その運動単位の発火閾値との間に、有意に負の相関が認められた。
3. 運動単位の発火閾値と振幅には、統計的に有意な正の相関が認められた。
4. 咬合力の方向が前方ないし対側のときには、発火を認める運動単位の割合が高いが、咬合力方向が後方ないし同側のときには、その割合は低下した。
5. 運動単位の活動領域は、その記録部位によって異なり、前部および深部より記録した運動単位で広く、浅部の運動単位で狭い傾向が認められた。
6. 運動単位の活動領域は、前後的な記録部位間と比較して、深さの異なる記録部位間で、その差が著明であった。
7. 以上の咬筋各部位における運動単位活動の結果から、咬筋の各部位は選択的な活動を営んでいることが判明した。この機能的分化は、咬筋内部の形態学的特徴に基づくものと推察された。

謝 辞

稿を終るに臨み、終始懇篤なる御指導と御校閲を賜りました鹿沼晶夫教授、渡辺 誠助教授に深甚の謝意を表します。

齒科補綴学第二講座の各位より蒙った激励啓発に厚く感謝いたします。

文 献

- 1) 森 於菟, 大内 弘: 解剖学, ed 11. 筋学. 金原書店, 東京, 1982, pp. 288-296.
- 2) 上条雍彦: 口腔解剖学, 2. 筋学. アナトーム社, 東京, 1966, pp. 252-255.
- 3) Davies, D.V. and Davies, F.: Gray's Anatomy, ed 33. Longmans, Green & Co., London, 1962, pp. 581-585.
- 4) Romanes, G.L.: Cunningham's Manual of Practical Anatomy, ed 14. Medical Pub., Oxford, 1979, pp. 16-17, 97-98.

- 5) Du Brul, E.L.: Sicher's Oral Anatomy, ed 7. The CV Mosby Co., St. Louis, 1980, pp. 147-149.
- 6) 吉川徹雄, 鈴木孝司: ヒトの咬筋の層分化 — とくに浅側頭筋, 上顎下顎筋と頬骨下顎筋について. 解剖誌 **37**: 260-267, 1962.
- 7) 沢田 隆: ヒト咀嚼筋の解剖学的研究 — 咬筋・側頭筋の層構造および形態 —. 神大医紀 **35**: 251-279, 1976.
- 8) Ebert, H.: Morphologische und funktionelle Analyse des Musculus masseter. Z. anat. EntwGesch. **109**: 790-802, 1939.
- 9) Schumacher, G.-H.: Funktionelle Morphologie der Kaumuskulatur. VEB Gustav Fischer Verlag, Jena, 1961, pp. 13-53.
- 10) Eriksson, P.-O. and Thornell, L.-E.: Histochemical and morphological muscle fiber characteristics of the human masseter, the medial pterygoid and the temporal muscles. Archs oral Biol. **28**: 781-795, 1983.
- 11) Serratrice, G., Pellissier, J.F., Vignon, C. and Barret, J.: The histochemical profile of the human masseter. J. Neurol. Sci. **30**: 189-200, 1976.
- 12) 三浦不二夫: 筋電図法による咀嚼筋の活動様式に関する研究 (特に咬筋, 側頭筋, 顎二腹筋について). 口病誌 **23**: 291-320, 1956.
- 13) Herring, S., Wineski, L.E. and Anapol, F.C.: Neural organization of the masseter muscle in the pig. J. Comp. Neurol. **208**: 563-576, 1989.
- 14) Weijs, W.A. and Dantuma, R.: Functional anatomy of the masticatory apparatus in the rabbit (*Oryctolagus cuniculus* L). Netherlands J. Zool. **31**: 99-147, 1981.
- 15) Eriksson, P.-O., Stålberg, E. and Antoni, L.: Flexibility in motor unit firing pattern in the human temporal and masseter muscles related to type of activation and location. Archs. oral Biol. **29**: 707-712, 1984.
- 16) Belser, U.C. and Hannam, A.G.: The contribution of the deep fibers of the masseter to selected tooth-clenching and chewing tasks. J. Prosthet. Dent. **56**: 629-635, 1986.
- 17) Goldberg, L.J. and Derfler, B.: Relationship among recruitment order, spike amplitude and twitch tension of single motor units in human masseter muscle. J. Neurophysiol. **40**: 879-890, 1977.
- 18) Yemm, R.: The orderly recruitment of motor units of the masseter and the temporal muscles during voluntary isometric contraction in man. J. Physiol. (Lond.) **265**: 163-174, 1977.
- 19) Desmedt, J.E. and Godaux, E.: Recruitment patterns of single motor units in the human masseter muscle during jaw clenching. Archs. oral Biol. **24**: 171-178, 1979.
- 20) Nordström, M.A. and Miles, T.S.: Fatigue of single motor units in human masseter. J. Appl. Physiol. **68**: 26-34, 1990.
- 21) 菊池雅彦, 服部佳功, 渡辺 誠: 三次元咬合力と咀嚼筋 EMG の動態, 顎機能 **8**: 111-118, 1989.
- 22) Watanabe, M. and Hannam, A.G.: Bite force in three dimensions and associated jaw muscle activity. J. Dent. Res. **65**: 804, 1986.
- 23) 菊池雅彦, 渡辺 誠, 服部佳功, 鹿沼昌夫: 3次元咬合力測定装置の開発. 顎機能 **7**: 205-210, 1988.
- 24) 服部佳功, 菊池雅彦, 渡辺 誠: 三次元咬合力のリアルタイム測定. 顎機能 **8**: 45-50, 1989.
- 25) Tonndorf, M.L., Sasaki, K. and Hannam, A.G.: Single-wire recording of regional activity in the human masseter muscle. Brain Res. Bull. **23**: 155-159, 1989.
- 26) van Eijden, T.M.G.J.: Jaw muscle activity in relation to the direction and point of application of bite force. J. Dent. Res. **68**: 901-905, 1990.
- 27) McMinn, R.M., Hutchings, R.T. and Logan, B. M.: Head and Neck Anatomy. Year Book Medical Pub. Inc., Chicago, 1981, pp. 114-115.
- 28) Gans, C. and Bock, W.J.: The functional significance of muscle architecture—a theoretical analysis. Ergeb. Anat. Entwicklungsgesch. **38**: 115-142, 1965.
- 29) Herring, S.W., Grimm, A.F. and Grimm, B.R.: Functional heterogeneity in a multipinnate muscle. Amer. J. Anat. **154**: 563-576, 1979.